

建設から75年経過した開削SRCトンネルの 調査・診断

Survey and Examination of SRC Tunnel where 75 Years Passed after the Construction

山本努¹・松川俊介²

Tsutomu Yamamoto and Shunsuke Matsukawa

¹正会員 東京地下鉄(株) 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目19-6)

E-mail:t.yamamoto@tokyometro.jp

²正会員 工修 東京地下鉄(株) 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目19-6)

The tunnel between Suehirocho Station and Asakusa Station of Tokyo Metro Ginza line, which was made with steel frame reinforced concrete, passed after construction for 75 years. In order to evaluate to soundness of this tunnel, we carried out survey, examination, estimation of deterioration mechanism, prediction of deterioration progress, judgments and examination of the countermeasure. In addition, We did verification of fatigue and strength by numerical analysis. As a result, it was found out that tunnel which passed in 75 years would have been used safely, if repair would be done appropriately. The outline is reported about the above contents.

Key Words : reinforced concrete, deterioration, corrosion of reinforcing bar, water content, soundness

1. はじめに

トンネルをはじめとする社会基盤としてのコンクリート構造物は、建設から長期間経過したストックが増大しており、これまでの新規建設の時代から維持管理の時代に転換しつつあるといえる。2001年には「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」が制定され、また、調査・試験・予測・補修技術についての研究開発が各方面で進められているところである。

東京メトロでは、銀座線のトンネルが我が国初の地下鉄として大正時代に建設が開始され、75年以上経過している。

構築の一部のコンクリートに初期欠陥等も見られたことから、これまでに必要な区間は補修・補強工事を実施して改善してきたが、これからも末永く安全な状態で供用していくため、現状と将来の健全性を総合的に評価し、今後の維持管理の方針を明確にすることを目的に、今回、「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」に準拠して詳細な調査・試験、劣化機構推定、進行予測、評価、対策検討等に加え、

レーザードップラー振動計による疲労照査や三次元モデルによる構造解析も行ったので、その概要を報告するものである。

2. トンネルの概要

本調査で対象とした、末広町～浅草駅間（営業キロ 3.3km）は、諸外国の技術を参考に、鉄骨と鉄筋コンクリートで造られた2線部箱型トンネルが連続している区間である。トンネルの俯瞰図を図-1に示す。

当時の資料・図面による構造の概要等は以下のとおりである。

(1) トンネルの構造

当該区間は開削工法により、図-2のようにトンネル縦断方向に鉄骨を組んだ枠（鉄構框と称する）を一定間隔に並べ（上野～浅草駅間は 1.524m、末広町～上野駅間は 2.286m）、鉄構框間に鉄筋コンクリートの上床・側壁・下床スラブを配置する構造で建設されている。

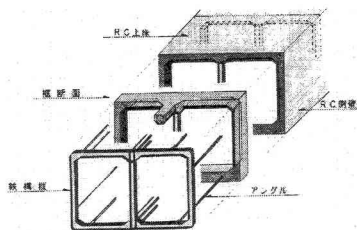


図-1 トンネル俯瞰図

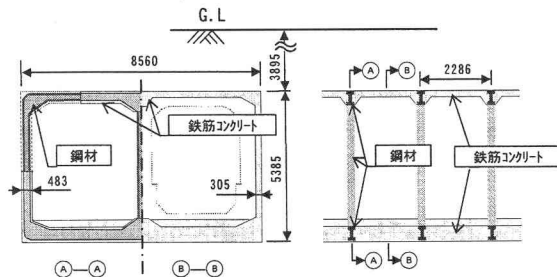


図-2 トンネルの構造（上野広小路～上野間）

(2) 構造設計の考え方

鉄構框構造を採用したのは、工事中に直接路面荷重を支持できることや、型枠を据え付ける際に支持体にできて便宜であろうとの理由であったが、鉄骨の組立に困難と時間を要し、不経済であることが明らかになったため、これ以降の工区では基本的に鉄筋コンクリート構造を採用するようになった。

表-1 に当時の設計基準と、現在建設中の 13 号線の設計基準も参考として併記する。これによると、路面交通荷重が現在の基準より小さいことがわかる。また、コンクリートの強度は許容曲げ圧縮応力度のみの 3.5N/mm^2 と記述されており、現在でいう設計基準強度は 10N/mm^2 程度と推定される。

表-1 主な設計基準

		銀座線末広町～浅草 (建設当時)	13 号線の例 (参考)
路面 交通荷重	土の単位 体積重量	地下水位以上 16 kN/m^3 地下水位以下 20 kN/m^3	地下水位以上 16 kN/m^3 地下水位以下 20 kN/m^3
	土被り	荷重	土被り 荷重
	2.5m	7.6 kN/m^2	17.0 kN/m^2
	3.0m	6.7 kN/m^2	14.0 kN/m^2
	4.0m	6.0 kN/m^2	11.0 kN/m^2
許容 応力度	死荷重	鉄筋コンクリート 24.0 kN/m^3	鉄筋コンクリート 25.0 kN/m^3
	コンクリート	設計基準強度 記述なし 許容曲げ圧縮応力度 3.5 N/mm^2	設計基準強度 24 N/mm^2 許容曲げ圧縮応力度 9 N/mm^2
	鋼材	鉄材 120 N/mm^2	熱間圧延棒鋼 1 種 SR235 140 N/mm^2

(3) 使用材料

鋼材は「建築用鋼」、鉄筋コンクリート用セメン

トは「ポルトランドセメント」を使用し、構築コンクリートの配合は $1:2:4$ (=セメント:砂:砂利の容積比と考えられる) と記述されている。

(4) 鉄筋

鉄筋コンクリートスラブ部分の主筋は 13mm 、 16mm の丸鋼で、間隔は $100\sim 150\text{mm}$ 、かぶりは $50\sim 75\text{mm}$ で設計されている。

(5) 建設工法

工事施工は、掘削・覆工方式によって行われており、コンクリートは路面上の電動混合機で練り上げ、斜路シュートにより坑内に流して打設した。

建設当時地下水位は地表面下およそ 1.5m にあり、トンネルはその下に位置するため、トンネル構築の外囲を取り巻くように、アスファルト防水層と保護モルタルの 2 層からなる防水工が施されている。

3. 現地調査・試験

対象区間全体の構造物の現状を把握し、劣化機構を推定するとともに、構造解析、劣化進行予測、評価、対策の検討のための基礎データを得ることを目的に、表-2 のとおり現地調査・試験を実施した。

なお、今回の調査・試験は主に駅間トンネルの上部・側部を対象としており、軌道道床があり調査が困難で、剥落による危険性が低いトンネル下部については最小限の調査に留めた。

以下に主な調査・試験結果の概要を記す。

表-2 調査・試験項目、箇所数

調査項目	箇所数
近接目視・打音調査	12 箇所 (200m 毎)
ドリル法による中性化深さ測定	54 断面 261 箇所
電磁誘導法による鉄筋かぶり測定	54 断面 261 箇所
はつり法による鉄筋種別・鉄筋腐食度・鉄筋かぶり測定、中性化深さ測定	13 箇所
自然電位補正法による鉄筋腐食度調査	4 箇所
コア採取による圧縮強度試験	35 箇所 105 本
反発硬度法による圧縮強度推定	18 箇所
表面含水率・内部含水率測定	24 箇所
漏水の成分分析	3 箇所
水セメント比推定	5 箇所 5 本
配合推定	5 箇所 5 本
コンクリート成分分析	5 箇所 10 本
框鋼材の腐食度調査	5 箇所
鉄筋採取による引張強度試験	9 箇所 9 本
構築の内空断面測定	7 断面
漏水発生状況調査	全区間
湿度・温度測定	20 箇所
近接工事にともなう側壁撤去箇所内部の状況調査	1 箇所
レーザードップラー振動計によるトンネル上床の振動測定	1 箇所

(1) 目視・打音調査

現在の変状の発生状況と、過去の調査との比較から変状の進行性の有無を把握するために実施した。変状展開図の一部を図-3に示す。

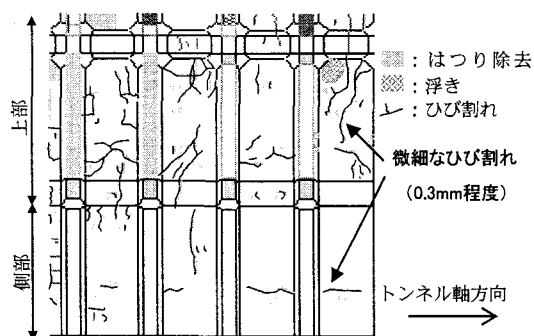


図-3 変状展開図の一部

対象区間で見られる変状は、ひび割れ、浮き、ジャンカ、漏水、漏水痕、エフロレッセンスであり、鉄筋腐食を想定させる錆汁は見られなかった。ひび割れ幅は0.1～0.3mm程度のものが多く、縦断または横断方向どちらかに規則的な方向性を持っているものではなく、また、アルカリ骨材反応や化学的腐食を想定させるものでもなかった。

いずれの変状も、昭和62・63年の調査時と比べ、大きな変化は見られなかった。

ジャンカも見られたが、粗骨材同士は結合しており、叩いても剥離するような状態ではなかった。

(2) 中性化深さ測定・鉄筋かぶり測定

対象区間の全体的な中性化の進行程度を把握するため、ドリル法により中性化深さを測定した。また、同一箇所における鉄筋かぶりを電磁誘導法にて測定した。中性化深さの分布を図-4に示す。また、測定された中性化深さ・鉄筋かぶり、算出した中性化残りの平均値を表-3に示す。

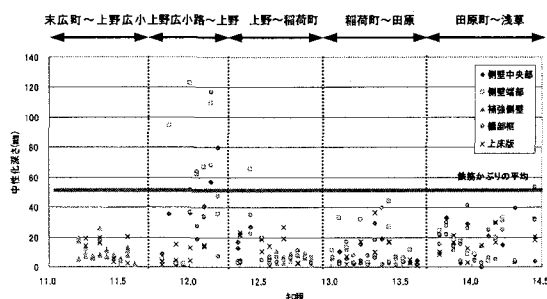


図-4 ドリル法による中性化深さ分布

表-3 中性化深さ、鉄筋被り、中性化残りの平均

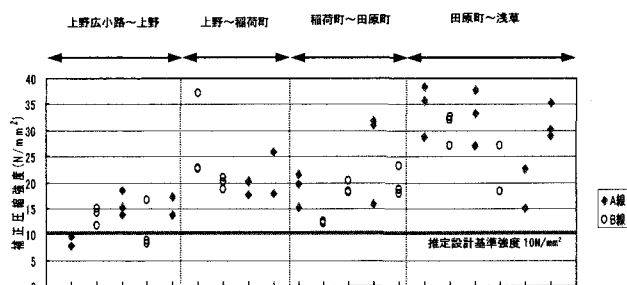
駅間	部位	中性化深さ(mm)	鉄筋被り(mm)	中性化残り(mm)
末広町～上野広小路	上床	13.4	43	29.6
上野広小路～上野	側壁	43.4	52	8.6
	側部框	34.1	39	-4.9
	上床	9.0	52	43.0
上野～稲荷町	側壁	21.7	66	44.3
	側部框	10.0	33	23.0
	上床	14.1	41	26.9
稲荷町～田原町	側壁	11.9	42	30.1
	側部框	6.5	47	40.5
	上床	14.0	34	20.0
田原町～浅草	側壁	18.5	40	21.5
	側部框	18.3	43	24.7
	上床	15.5	38	22.5

※ 側壁スラブを増厚補強した区間（末広町～上野広小路の全区間と上野～稲荷町の一部区間）は除く

中性化深さは、上野広小路～上野駅間ではバラつきが大きく、100mmを超える箇所もあり、中性化残りがマイナスとなる箇所も多かった。それ以外の駅間は多少バラつきも見られたが、概ね約40mm以内であった。ジャンカ等の空隙が偏在している箇所では、バラつきが大きく進行していた。

(3) 圧縮強度試験

対象区間のコンクリートの強度を把握するために、コアを採取し圧縮強度試験を実施した。トンネル側部の圧縮強度の分布を図-5に示す。



※ 側壁スラブを増厚補強した末広町～上野広小路は除く

図-5 トンネル側部の圧縮強度の分布

全区間の側部・上部の平均値は21.2N/mm²で、上野広小路～上野駅間では平均で12.8N/mm²と低かったが、推定される設計基準強度10N/mm²はほぼ上回っていた。昭和62・63年の試験結果との比較では強度が低下している区間はなかった。

なお、トンネル下部のコアも1箇所3本採取したが、平均58.2N/mm²と非常に強度が高いことがわかった。

(4) 鉄筋腐食度調査

現在の鉄筋腐食状況の把握と、ひび割れ・浮き等の変状や中性化深さとの関係を把握するため、自然電位補正法とはつり箇所を目視による鉄筋腐食度調査を行った。調査箇所では中性化深さも併せて測定した。

自然電位補正法、はつり目視のいずれも腐食度はⅠ（腐食なし）～Ⅲ（薄い浮き錆）が殆どであったが、一部でⅣ（軽微な断面欠損）の箇所も見られた。

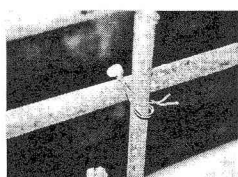
腐食度がⅢ、Ⅳとなっていた箇所の近傍には、漏水・漏水痕、コールドジョイント等が見られた。

各駅間の代表箇所での鉄筋腐食度と中性化残り・周辺変状の関係を表-4 に示す。これを見ると中性化が鉄筋位置を超えて進行している、必ずしも鉄筋腐食度は高いとは限らないことがわかる。

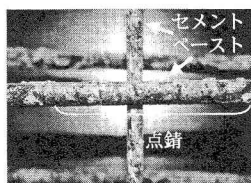
表-4 各駅間の代表箇所での鉄筋腐食度と
中性化、変状の関係

測定箇所	鉄筋腐食度	中性化残り	変状	腐食度調査方法
上野広小路 ～上野	Ⅳ	1.1	漏水痕・浮き ひび割れ	自然電位
上野 ～稲荷町	Ⅱ	56.0	ひび割れ	はつり
稲荷町 ～田原町	Ⅱ	-11.0	浮き ひび割れ	はつり
田原町 ～浅草	Ⅱ	-21.4	ひび割れ	はつり

参考として、近接工事に伴い側壁を撤去した箇所の鉄筋腐食状況を写真-1 に示す。ここでは、コンクリートに変状が見られない健全部分では腐食もなく結束線も健全な状態で残っていたが、内部にジャンカが見られた部分では表面に点錆が見られた。



健全部の鉄筋腐食状況
（Ⅰ；腐食なし）



ジャンカ部の鉄筋腐食状況
（Ⅲ；全体的に表面の点錆）

写真-1 鉄筋の腐食状況の例

(5) コンクリート含水率測定

鉄筋の腐食速度に影響を与えるコンクリートの含水状態を把握するため、電気抵抗式水分計を用いて表面・内部含水率の測定を行った。実施箇所は、(4)の鉄筋腐食度調査箇所に加え、漏水・漏水痕・漏

水補修痕における含水率の分布も併せて測定した。

測定結果は、健全箇所だけでなく、ひび割れ・浮き・ジャンカがある箇所でも表面含水率は 1～2%程度、内部含水率は 0～1%程度と極めて低い値であり、コンクリートがかなり乾燥している状況であることが分かった。内部含水率は、深さ 100mm まで 10mm ピッチで測定したが、いずれの箇所でも深さ方向にほぼ一様に分布していた。

これによると、中性化が鉄筋位置を超えて進行している、内部含水率が低いため、水分の供給が少ないことから、腐食が進行しにくいことがうかがえる。

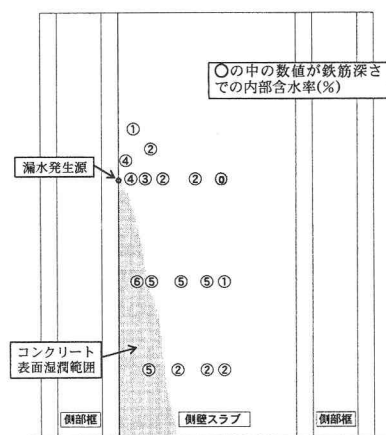


図-6 漏水箇所における含水率状況

ただし、漏水が発生している箇所では、図-6 のように漏水の発生源とその下方の表面湿潤範囲において、鉄筋深さでの内部含水率が 4%以上に達していた。また、過去の漏水発生痕や漏水補修痕の内部含水率は、漏水が無い箇所よりは高く、一部鉄筋位置で 3%程度となる箇所が見られた。

(6) コンクリート・漏水の成分分析

中性化以外の劣化機構の可能性を明らかにするため、蛍光 X 線分析装置によりコンクリートの成分を、イオンクロマトグラフィー・原子吸光光度計により漏水の成分を分析した。

コンクリート、漏水とも、塩害・アルカリ骨材反応・化学的腐食の原因となる塩化物イオン・ナトリウム・カリウム・硫酸・マグネシウムが特に多い箇所はなかった。

(7) コンクリートの水セメント比・配合の推定

コンクリートの品質を把握するため、コンクリートコアを採取し、水量指数法により水セメント比を、セメント協会法によりセメント・骨材の単位量を求めた。結果を表-5 に示す。

表-5 推定される水セメント比および配合

コア採取箇所	水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)	
		セメント	骨材
末広町～上野広小路	68	206	1995
上野広小路～上野	76	183	1937
上野～稲荷町	65	196	1997
稲荷町～田原町	58	351	1753
田原町～浅草	46	214	1991

水セメント比は、末広町～稲荷町駅間で 65%以上と高く、配合推定結果でも単位セメント量が 200kg/m³ 程度以下と、現在より大幅にセメント量が少ないことがわかった。当時の資料には、セメント：細骨材：粗骨材の比率が 1:2:4 と記述されていたが、配合推定結果からはセメントと骨材総量の比はおおよそ 1:9～10 程度となり、実際は貧配合のコンクリートであったと推察される。

4. トンネル上床の振動計測と疲労照査

当該トンネルは土被りが小さく、上床に微細なひび割れも見られたため、路面交通荷重の繰返しがトンネルに影響を与える可能性を確認することを目的に、レーザードップラー振動計を用いてトンネル上部の振動を測定した。測定箇所は対象区間のうち土被りが小さく、かつ路面交通量が多い地点を選定し、トンネル内に振動計を固定して、路面の車両通行状況を確認しながらトンネル上部の振動を測定した。

また、測定結果の妥当性の検証と疲労照査も併せて行った。図-7 に測定状況の模式図を示す。

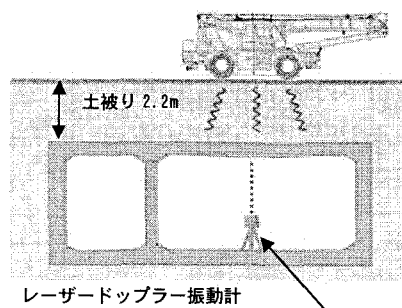


図-7 振動測定状況模式図

(1) 振動測定結果

測定した速度波形を積分・フーリエ解析することにより変位と卓越振動数を算出した。結果を表-6 に示す。

表-6 測定結果

ケース	荷重		上床部分		上部框部分	
	大型車	電車	片振幅 変位 (mm)	卓越 振動数 (Hz)	片振幅 変位 (mm)	卓越 振動数 (Hz)
1	—	—	0.003	0.15	0.003	0.15
2	○	—	0.073	0.27	0.075	0.27
3	—	○	0.025	0.46	0.017	0.46
4	○	○	0.091	0.11	0.076	0.11

測定は路面の大型車通過時だけでなく、トンネル内の電車通過時についても行った。その結果、路面の大型車通過時の影響が大きく、変位（片振幅）の最大値は、ラフタークレーン走行時の 0.075mm であった。

(2) 測定結果の妥当性検証と疲労照査

測定結果の妥当性を検証するとともに、路面交通荷重の影響による疲労照査を行うため、測定地点のトンネル断面の二次元フレーム解析を実施した。

いくつかの荷重条件を設定して解析した結果、走行した大型車の推定荷重を作用した場合、上床と下床の相対変位量は実測値とほぼ同程度であったため、測定結果は妥当であると考えられる。

また疲労照査として、解析結果から大型車通過の影響による鉄筋の疲労寿命回数を算出すると 6.5×10^{17} 回となるが、既存調査から当該道路での大型車通行回数を推定すると年間 5.48×10^4 回であり、 10^{13} という途方もないオーダーの開きがあるため、当該トンネルが供用期間内に路面交通荷重により疲労破壊する可能性は極めて小さいと考えられる。

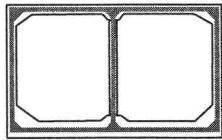
5. 構造解析

当該トンネルは建設から相当年数が経過し、路面荷重等の環境条件が変化していることと、当時の設計計算書も現存していないことから、現在の荷重条件・材料物性値を用いた構造解析を実施して、現有耐力と安全性を評価することとした。

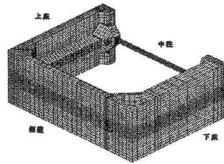
(1) 解析モデル

今回は、解析が容易で実績豊富な 2 次元フレーム線形解析を行ったほか、SRC 構造のトンネルが縦断方向に対して不連続であるため、それを忠実に再現できるよう、6 面体立体要素の集合である 3 次元ソリッドモデル解析も用いて解析・照査した。

解析モデルと出力結果の例を図-8、図-9 に示す。

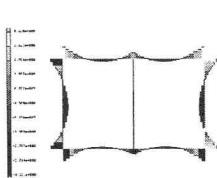


2次元モデル

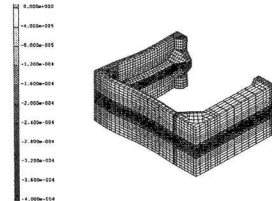


3次元モデル

図-8 解析モデル



2次元モデル



3次元モデル

図-9 解析出力結果の例

(2) 解析の諸条件

解析断面は、標準的な構造で土被りが深い箇所を選定した。当該区間では框鋼材(鉄骨)の被りコンクリートに浮きが見られ剥離除去した箇所が数多くあることや、既に補修されているが過去にやや大きなジャンカも発見されていたことから、3次元解析ではこれらコンクリートの要素の一部が欠損または剛性低下しているケースも設定した。

荷重条件・安全係数は「鉄道構造物設計標準(開削トンネル・コンクリート構造物)」と現在建設中の13号線の設計示方書により、現在の条件を設定した。

各材料の強度等の特性値は、今回実施した試験結果を用いた。コンクリート圧縮強度、鉄筋引張強度の特性値は、限られたサンプル数であるため真の平均値を上回って安全側に照査されることのないよう、実測した平均値を下方に補正して設定した。

なお、耐震の検討は別途実施しているため、今回は耐震の検討は行っていない。

(3) 解析・照査結果

2次元・3次元とも、曲げ耐力・軸耐力・せん断耐力のいずれも応答値 I_{Rd} は設計耐力 I_{Ld} を下回っており、3次元解析での照査結果では $I_{Rd}/I_{Ld}=0.3\sim0.6$ 程度であり、十分な耐力余裕があることが確認された。

また、鉄骨被りコンクリートの剥離除去ケース、ジャンカケースについても耐力余裕が見られた。ただし、極端なケースとして、上床スラブの全面の被りコンクリートが除去され、鉄筋の定着が全くとれ

ていないケースを設定すると、 I_{Rd}/I_{Ld} が1.0を超え、さすがに安全上問題が生じることが判った。

今回はまた、3次元モデルで鉄骨・鉄筋・コンクリートそれぞれの要素に別剛性を与え、実建設工程の荷重履歴を定め、コンクリートの曲げ引張ひび割れの発生を表現した非線形解析も試行的に行った。

これによると、コンクリートのひび割れは非常に小さく、ひび割れ発生位置の鉄筋の引張応力も最大で 25N/mm^2 程度と小さいことから、発生している曲げひび割れの幅は 0.1mm 程度の小さいものであると推定される。

6. 劣化進行予測

現地調査・試験の結果から、当該トンネルの主な劣化機構は中性化と推定されるため、まず中性化の進行予測を行った。ただし、本区間においてはコンクリートの含水率が低いため、中性化が進行しても漏水等がなければ、鉄筋の腐食速度が極めて低いことが推察される。そこで、現地調査から得られた含水率を用いて、中性化が鉄筋位置まで達した後、鉄筋腐食によるひび割れが発生するまでの期間を予測した。

(1) 中性化進行予測

劣化進行予測は、以下の式から行った。

$$Y=b\sqrt{t}$$

Y: 中性化深さ (mm)

t: 中性化期間 (年)

b: 中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{t}$ 年)

中性化速度係数bは、ドリル法による中性化深さの実測値から求めた。全サンプルの平均中性化速度係数bは2.1であり、トンネル側部は平均2.3であるのに対して上部は1.5と低かった。

進行予測結果は、駅間の平均値でみると、上野広小路～上野駅間の側部において、今後約30年後に中性化深さが鉄筋位置まで到達するが、その他は50年後、つまり建設後約130年経過してもほとんどが鉄筋位置まで到達しない結果となった。

(2) 鉄筋腐食によるひび割れ発生時期の予測

中性化は平均値で見ると今後相当年数が経過しても鉄筋位置まで達しないが、個々の実測値をみるとバラつきが見られ、また、コンクリートの含水状態によっても鉄筋腐食速度が大きく異なることが考えられる。

そこで、まだ研究例は少ないが、現時点での対策要否の判断材料の一つとするために、既存の研究事例を参考に、中性化の鉄筋腐食によるひび割れ発生

時期の予測を行った。

予測するためには、腐食速度、ひび割れ発生腐食量、現在の腐食量を求める必要がある。腐食速度は、既往研究からコンクリート含水率と分極抵抗との関係、分極抵抗と腐食電流密度との関係から、含水率より腐食速度を算出した。このとき、分極抵抗は含水率 3.1%を下回ると急激に大きくなる傾向がある。従って漏水が有る場合（含水率 3.1%以上）と無い場合（3.1%以下）の 2 種類の腐食速度を算出した。

ひび割れが発生する腐食量は、既往研究では 50～90mg/cm²という値が得られているが、安全側の評価とするため 50mg/cm²とした。

現在の腐食量は、現地調査結果から変状パターン毎の腐食グレードを想定し、既往文献を参考に腐食量を設定した。

以上からひび割れが発生するまでの期間を予測した結果を表-7 に示す。

表-7 変状パターンとひび割れ発生までの期間

変状パターン		現在腐食 グレード (現腐食量 mg/cm ²)	ひび割れ 発生まで の腐食量 (mg/cm ²)	ひび割れ 発生までの 予測年数 (year)
漏水	外観上 の変状			
あり 含水率 3.1%以上 損失腐食率 2.42cm ² /year	あり	IV (96)	50-96= -46	既に発生 レベル
	なし	III (32)	50-32= 18	18/2.42≒ 7.4 年
なし 含水率 3.1%以下 損失腐食率 0.242cm ² /year	あり	II (16)	50-16= 34	34/0.242≒ 140.5 年
	なし	I (0)	50-0= 50	50/0.242≒ 206.6 年

これによると、漏水がない場合、ひび割れ発生までの期間は 140～200 年となるが、漏水があると既にひび割れが発生しているか、約 10 年以内にひび割れが発生すると予測された。

7. 評価

(1) 外力による影響の可能性

当該区間のトンネルは、過大な外力による変形で生じるようなひび割れが見られないこと、経年による強度低下が認められないこと、耐荷性に影響するような鉄筋の断面欠損が見られないこと、構造解析・照査結果で現在の荷重条件・材料物性値でも十分な耐力余裕があること、振動測定結果から疲労破壊の可能性がないことから、過大荷重や疲労など外力の影響による変状は発生していないと考えられる。

(2) 劣化機構と現状の劣化過程

当該区間では 75 年以上経過しているため中性化が全体的に進行しており、一部で鉄筋位置以上の箇所も見られた。

トンネル外側の防水層が健全であること（近接施工に伴う側壁撤去箇所を確認）、トンネル内はそもそも雨掛りがないこと、トンネル内の湿度がそれほど高くないこと（測定の結果、地上部と同程度）から、一般的な箇所では含水率が極めて低く、中性化が進行していても鉄筋の腐食速度は極めて低い。しかし、中性化が進行し、かつ漏水が発生している箇所では、腐食速度が大きくなる。これらは、実際にはつり出した鉄筋の観察結果とも符合するものであった。

一方、各調査結果から、塩害やアルカリ骨材反応、化学的腐食の可能性はないと判断できる。

従って、当該区間の劣化機構は中性化と判断され、現在の劣化過程は一部加速期（腐食ひび割れ発生）の初期段階にあるが、大部分は潜伏期（中性化深さが腐食発生限界に達するまで）～進展期（鋼材の腐食が開始から腐食ひび割れ発生まで）にあると推定される。

(3) 要求性能の照査

今回、これまで主に設計作業段階で行われていた要求性能照査を、「鉄道構造物等設計標準（コンクリート構造物）」を参考に、既設構造物への評価方法として適用を試みた。照査する性能項目は、安全性の破壊・疲労破壊・走行安全性・公衆安全性とした。

照査の結果、現在は基本的に全ての性能項目を満足していると判断できた。

将来については、含水率の高い漏水箇所は、対策を講じない場合近い将来に剥落危険性が高くなり、公衆安全性を満足できない可能性があるため、何らかの対策が必要であると判断できた。一方、破壊安全性については、少なくとも公衆安全性が維持されていれば、破壊することは考えられず、また走行安全性についても破壊安全性が満足していれば、維持できると考えられる。疲労破壊については、疲労寿命予測結果より将来的にも維持されると判断できた。

8. 対策の検討

以上の結果から当該トンネルでは、過大荷重や疲労など外力の影響による変状は発生しておらず、破壊・疲労破壊に対する安全性は満足しており、現状においては耐荷性や剛性の回復・向上のための補強は不要と判断できた。

ただし、所々で漏水やひび割れ・浮き等の変状が

見られるため、漏水補修、断面修復等の補修工事を確実に実施していくものとした。

また、今回行った解析や予測の分野は研究途上であるのが現実であり、今回得られた各種データも不確定要素が存在するため、今回の調査診断結果を長期的にフォローするための定期的なモニタリングを実施することとして、現在その手法を検討しているところである。

9. 考察

当該トンネルは、経年による中性化が進行していたが、漏水部分を除くと含水率が極めて低いため、たとえ中性化残りがマイナスとなっている箇所でも鉄筋の腐食度が低いことがわかった。

従って当該トンネルのような構造物では劣化の進行程度は中性化深さのみでは評価できず、含水状態や実際の鉄筋の腐食状況も十分に考慮する必要があると考えられる。

当該区間のうち、上野広小路～上野駅間は漏水・鉄筋腐食が比較的多く見られ、水セメント比が高く、低いコンクリート圧縮強度で他駅間より中性化が進行していたが、この工区は諸般の事情により、構築工の施工期間を短くせざるを得なかったとの記録があった。

従って急速な施工が行われた疑いのある箇所が今後判明した場合は、コンクリートの耐久性に関わる指標を十分に把握するために、入念な調査・診断が必要であると考えられる。

当該区間は全体的にセメント量が少なく、現場練りだったため現在のコンクリートより圧縮強度は低いものであったが、現地調査や構造解析・照査結果から耐力上問題がないことが確認された。

つまり、75年以上前に建設されたトンネルであったが、建設当時の設計基準・手法は十分適切なものであったといえる。

今回の調査・診断は、「コンクリート標準示方書〔維持管理編〕」に準拠して、多くの調査・試験・解析・照査等を系統立てて実施した結果、現状と将来の健全性を総合的に評価し、今後の具体的な対策方針を明確にすることができた。

今後もコンクリート構造物の維持管理においては、安易な対処療法とならないよう、適確な方法での調査を行い、劣化機構と将来の進行性を見極めたうえで、対策方法を決定すべきであると考ええる。

10. おわりに

今回の調査・診断結果をもとに、現在銀座線では補修工事を計画的に実施しているとともに、モニタリング計画策定のための調査を行っているところである。

また、今回の検討手法をベースに、全路線のトンネル・高架橋等の構造物についての調査・診断にも着手している。

東京の重要な社会基盤としての財産を所有し供用していく立場として、これからもトンネル等の構造物を末永く安全な状態で提供していくために、より適確で効果的な維持管理ができるよう検討を進めていきたい。

謝辞：本調査・診断にあたっては、東京大学の魚本先生、東京工業大学の二羽先生、埼玉大学の奥井先生、東京大学の加藤先生、(財)地域地盤環境研究所の小山先生、(財)鉄道総合技術研究所の皆様、魚本研究室の皆様をはじめ、多くの関係者の方々に多大なるご指導、ご協力を頂きました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕, 2001.
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'05, 2005.
- 3) 東京地下鉄道株式会社：東京地下鐵道史, 1934.
- 4) 山本努, 佐々木孝彦, 平田隆祥, 佐藤登：建設から75年経過した銀座線トンネルのRCスラブの健全度調査, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, VI-137, 2005.
- 5) 飯島亨, 佐々木孝彦, 横田優, 松島学：塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中にある鉄筋の腐食に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 日本材料学会, Vol. 4, pp. 11-16, 2004.
- 6) (社)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説, 1997.